

В.М. Кириленко, К.В. Кириленко, М.О. Бudyкo, П.Л. Денисюк

Обґрунтування додаткових діагностичних параметрів для оцінки стану електричної ізоляції абсорбційними методами

В статті представлено результати аналізу екстремального характеру і зумовленої ним неоднозначності залежності абсорбційних коефіцієнтів від сталої часу абсорбції, а також залежності їх значень від відношення наскрізного опору ізоляції до її абсорбційного опору. Розраховано максимальні значення коефіцієнтів абсорбції і поляризації, а також сталої часу абсорбції, що відповідає їм, для різних значень відношення вказаних вище опорів. Обґрунтована можливість використання відношення наскрізного і абсорбційного опорів та абсорбційної сталої часу в якості додаткових діагностичних параметрів для усунення неоднозначності, пов'язаної з екстремальністю коефіцієнтів абсорбції і поляризації. Бібл. 15, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: неруйнівні методи діагностування електричної ізоляції, абсорбційні методи діагностування ізоляції, діагностичні параметри ізоляції, смісний і омичний коефіцієнти абсорбції, коефіцієнти абсорбції і поляризації.

В статье представлены результаты анализа экстремального характера и обусловленной им неоднозначности зависимости абсорбционных коэффициентов от постоянной времени абсорбции и зависимости их значений от отношения сквозного сопротивления изоляции к ее абсорбционному сопротивлению. Рассчитаны максимальные значения коэффициентов абсорбции и поляризации, а также постоянных времени абсорбции, которые соответствуют им, для различных значений отношения указанных выше сопротивлений. Обоснована возможность использования отношения сквозного и абсорбционного сопротивлений и абсорбционной постоянной времени в качестве дополнительных диагностических параметров для устранения неоднозначности, связанной с наличием максимумов коэффициентов абсорбции и поляризации. Библ. 15, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: неразрушающие методы диагностирования электрической изоляции, абсорбционные методы диагностирования изоляции, диагностические параметры изоляции, емкостной и омический коэффициенты абсорбции, коэффициенты абсорбции и поляризации.

Вступ. Для забезпечення ефективної і безвідмовної експлуатації електротехнічного і електроенергетичного обладнання проводять періодичний або неперервний контроль її технічного стану за допомогою руйнівних та неруйнівних електричних методів контролю і випробувань. До неруйнівних методів відносять використання електрофізичних і діелектричних характеристик, їх залежностей від інтенсивності дії електричного поля та зовнішніх факторів або їх відносних значень при різних значеннях параметрів діючих факторів.

Для оцінки технічного стану електричної ізоляції на практиці часто використовують результати його неруйнівного діагностування за значеннями електричного опору ізоляції і характеристиками абсорбційного струму, що протікає через ізоляцію при підключенні її до постійної напруги. Ці методи ґрунтуються на узагальненій еквівалентній схемі діелектрика (рис. 1).

До переваг узагальненої еквівалентної схеми неоднорідного діелектрика слід віднести прозорість інтерпретації фізичного змісту її елементів, їх безпосередній зв'язок з фізичними процесами в ізоляції з неоднорідних діелектриків, що визначають її експлуатаційні властивості і довговічність.

До елементів узагальненої еквівалентної схеми діелектрика належать:

- геометрична ємність C_g , що відображає ємність, пов'язану зі швидкими процесами електронної і іонної поляризації;
- наскрізний опір R_n , тобто усталене значення опору діелектрика протіканню постійного струму;
- ємність абсорбції C_a , що відповідає за повільні процеси міграційної поляризації, обумовленої накопиченням вільних зарядів на межах областей діелектрика з різними електрофізичними властивостями або в приелектродних областях;
- абсорбційний опір R_a , який вводиться для правильного відображення інерційних властивостей міграційної поляризації.

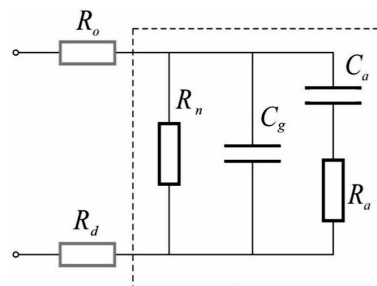


Рис. 1. Узагальнена еквівалентна схема ізоляції і елементи схеми вимірювання

Крім того, на рис. 1 показані схемні елементи:

- R_o – обмежуючий опір, що вводиться у вимірну схему для формування експоненціального струму заряду геометричної ємності;
- R_d – опір датчика для вимірювання напруги, яка відповідає абсорбційному струмові через діелектрик. Для того, щоб вони не впливали на результати діагностування, значення опорів цих резисторів повинні бути значно меншими за значення опорів витоків діелектрика.

У загальному випадку схема неоднорідного діелектрика може містити декілька кіл $C_a - R_a$, що відповідають абсорбційним процесам зі сталими часами встановлення різних видів міграційної поляризації. Зауважимо, що релаксаційна поляризація при використанні коефіцієнтів абсорбції та поляризації не враховується, тому що моменти часу, в які проводяться відлік абсорбційного струму для розрахунку значень цих параметрів значно перевищують сталі часи релаксаційних процесів.

Огляд стану абсорбційних методів діагностування електричної ізоляції. Абсорбційні діагностичні методи рекомендуються як нормативні для діагностування ізоляції трансформаторів, синхронних генераторів, компенсаторів, колекторних збудників і електродвигунів змінного струму [1]. Сучасні наукові

© В.М. Кириленко, К.В. Кириленко, М.О. Бudyкo, П.Л. Денисюк

дослідження абсорбційних методів і їх використання стосуються діагностування стану ізоляції обертових електричних машин [2, 3], низько- і високовольтних кабелів [4-7], силових трансформаторів [8-10].

При технічному діагностуванні застосовують два види коефіцієнтів абсорбції – омичний і ємнісний коефіцієнти, а також коефіцієнти, що визначаються відношенням значень абсорбційного струму в різні моменти часу, метод відновлюваної напруги і його сучасні різновидності, а також нелінійність абсорбційних характеристик і характеристик відновлюваної напруги.

Омичний коефіцієнт абсорбції дорівнює відношенню значень струму абсорбції чи ефективних опорів ізоляції, виміряних через 15 і 60 с для струмів або через 60 і 15 с для опорів:

$$k_a = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{1 + \frac{R_n}{R_a} \exp(-\frac{60}{\tau_a})}{1 + \frac{R_n}{R_a} \exp(-\frac{15}{\tau_a})}. \quad (1)$$

Крім омичного коефіцієнта абсорбції зараз використовують коефіцієнт поляризації k_p зі значеннями часу відліку струму абсорбції 60 і 600 с, відношення діелектричної абсорбції R_{30}/R_{15} та індекс поляризації R_{60}/R_{30} , коефіцієнт діелектричного розряду, а також коефіцієнт стану ізоляції, що визначається за значеннями двох струмів абсорбції, взятими на початковій ділянці струму абсорбції при 0,06 і 0,1 с, зарядом геометричної ємності і часовим інтервалом між відліками:

$$k_{ci} = \frac{i_{0,06} - i_{0,1}}{\Delta t \cdot q_g} = \frac{i_{0,06} - i_{0,1}}{0,04 q_g}.$$

Ємнісний коефіцієнт абсорбції визначається через відношення максимального значення відновлюваної напруги U_{rmax} до зарядної напруги U_0 :

$$k_c = \frac{U_{rmax}}{U_0} = \frac{C_a}{C_a + C_g}. \quad (2)$$

Відновлювана напруга виникає на ізоляції, якщо після повного заряду її відключити від джерела напруги, замкнути на невеликий опір на короткий проміжок часу для розряду геометричної ємності, а потім дати можливість абсорбційній ємності заряджати геометричну, напруга на якій буде зростати від нуля до максимального значення, а далі спадати до нуля внаслідок розряду через наскрізний опір.

Варіацією ємнісного коефіцієнта абсорбції є коефіцієнт дисперсії, що визначається шляхом заряду ємності ізоляції коротким прямокутним імпульсом тривалістю τ_1 напругою U_0 і вимірювання напруги U_d на ній після відключення від джерела напруги через інтервал часу $\tau_2 \gg \tau_1$, коли введений заряд перерозподілиться між геометричною і абсорбційною ємностями:

$$D = \frac{U_0}{U_0 - U_d} = \frac{C_g}{C_a} = \frac{1 - k_c}{k_c}.$$

Використання ємнісного і омичного коефіцієнтів абсорбції для оцінки стану електричної ізоляції має вагомий недолік: по-перше, вони є інтегральними характеристиками ізоляції; по-друге, визначаються співвідношенням значень декількох елементів еквівалентної схеми діелектрика; по-третє, не дають повного уявлення про процеси деградації ізоляції. Розглянемо ці питання більш детально.

Як впливає з формули (1), значення коефіцієнта абсорбції залежать від відношення наскрізного опору і опору абсорбції та від сталої часу абсорбції, що є інтегральними показниками, бо осереднюються по всьому об'єму ізоляції. Тому цей критерій можна використовувати тільки для оцінки загального стану ізоляції, такого як більш чи менш рівномірне зволоження або викликане її старінням загальне погіршення електрофізичних характеристик і зростання ймовірності відмови.

Крім того, всі коефіцієнти, що визначаються через відношення двох значень абсорбційного струму, як буде показано нижче, є екстремальними величинами і їх критеріальні значення можуть бути притаманні як зволоженій чи зістареній ізоляції, так і однорідній ізоляції, в якій абсорбційні процеси проявляються дуже слабо.

Ємнісний коефіцієнт згідно з формулою (2) характеризується співвідношенням геометричної і абсорбційної ємностей, що також є інтегральними характеристиками ізоляції, частково характеризує неоднорідність ізоляції і зростання її в процесі старіння. Однак, він взагалі не несе інформації про характер розподілу питомого опору і резистивні компоненти еквівалентної схеми, які відповідають за теплове старіння та тепловий пробій діелектрика, а також дає уявлення тільки про інтенсивність об'ємної міграційної чи приелектродної поляризації без конкретизації її характеристик, таких, наприклад, як стала часу міграційної поляризації. Крім того, значення U_{rmax}/U_0 буде залежати від відношення R_n/R_a , бо саме цим відношенням визначається напруга, що може виникнути на ввімкненій паралельно наскрізному опору R_n геометричної ємності C_g , а тому ємнісний коефіцієнт абсорбції буде тільки граничним значенням для відношення U_{rmax}/U_0 .

В літературі з метою більш адекватного технічного діагностування електричної ізоляції активно розглядаються подальші вдосконалення абсорбційних методів, основаних на відновлюваній напрузі [11-13]. При використанні методу відновлюваної напруги як діагностичні параметри ізоляції пропонується використовувати відношення максимального значення відновлюваної напруги до зарядної, початкову швидкість наростання відновлюваної напруги, час досягнення максимального значення відновлюваної напруги, коефіцієнти нелінійності відновлюваної напруги, сталу часу саморозряду, але в даній статті метод відновлюваної напруги не буде розглядатися.

Враховуючи поширеність абсорбційних методів, більшість сучасних вітчизняних і закордонних мегаометрів дозволяють не тільки вимірювати опір ізоляції, а й автоматично обчислюють коефіцієнт абсорбції і фіксують дані для розрахунку коефіцієнта поляризації. Ще більш детальне опрацювання абсорбційної кривої, включаючи і метод відновлюваної напруги, пропонується в спеціалізованих діагностичних системах.

Однак, слід зауважити, що при різноманітних пропозиціях вибору діагностичних процедур і параметрів та досить інтенсивній публікації результатів використання абсорбційних методів з діагностичною метою в вітчизняній і закордонній літературі, досить серйозними проблемами залишаються вибір критерію справного стану при використанні відповідних діагностичних параметрів та інтерпретація процесів, що

відбуваються в ізоляції, на основі змін конкретних діагностичних параметрів в часі, а водночас і отриманих результатів для оцінки стану електричної ізоляції.

Основним фактором, що суттєво знижує прогностичні можливості абсорбційних методів, є неусувне протиріччя між інтегральним характером діагностичних параметрів і локальним характером пробою, як катастрофічного процесу руйнування ізоляції. Абсорбційні методи можуть давати уявлення про загальний стан ізоляції, зумовлений тепловим старінням і іншими процесами, що приводять до погіршення загального стану ізоляції, але для прогнозування пробою вони не ефективні. Можливість пробою визначається характеристиками ізоляції в дуже обмеженому об'ємі, що складає соті-тисячні долі загального об'єму і тому на значення інтегральних характеристик впливають мало.

Перспективними в удосконаленні абсорбційних методів є роботи, в яких розглядаються методи визначення індивідуальних значень параметрів еквівалентної схеми заміщення ізоляції [14], але названої проблеми вони також не вирішують. Крім того, діагностичні параметри нестаціонарні в часі, що приводить до додаткових похибок при їх використанні для визначення технічного стану [15].

Слід відзначити, що закономірності зміни діагностичних параметрів в залежності від значень параметрів еквівалентної схеми ізоляції систематично не досліджувалися, хоч ця залежність приводить до неоднозначності критеріїв технічного стану та знижує їх прогностичну здатність. Як приклад можна навести екстремальність коефіцієнтів абсорбції і поляризації, які, як показано нижче, будуть близькими до одиниці і при сильно зволоженій і при практично однорідній ізоляції. Тому виникає потреба в усуненні цієї неоднозначності.

Метою цієї статті є дослідження екстремальності омічних абсорбційних коефіцієнтів та обґрунтування додаткових діагностичних параметрів для усунення неоднозначності коефіцієнтів абсорбції та поляризації, пов'язаної з наявністю максимуму в залежностях цих коефіцієнтів від абсорбційної сталої часу.

Аналіз екстремальності абсорбційних коефіцієнтів. Цей аналіз ми проведемо використовуючи узагальнену еквівалентну схему неоднорідного діелектрика (див. рис.1), що покладена в основу абсорбційних методів діагностування електричної ізоляції.

$$\frac{dk_a}{d\tau} = \frac{\frac{t_2}{\tau_a^2} x \exp\left(-\frac{t_2}{\tau_a}\right) + \frac{t_2}{\tau_a^2} x^2 \exp\left(-\frac{t_1+t_2}{\tau_a}\right) - \frac{t_1}{\tau_a^2} x \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_a}\right) - \frac{t_1}{\tau_a^2} x^2 \exp\left(-\frac{t_1+t_2}{\tau_a}\right)}{\left(1 + x \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_a}\right)\right)^2}.$$

Умова екстремуму $dk_a/dx = 0$ дає дві можливості. Перша $\tau_{amax} = \infty$ і $R_n/R_a \rightarrow \infty$. При таких умовах ізоляція

$$t_2 \exp\left(-\frac{t_2}{\tau_{amax}}\right) + t_2 x \exp\left(-\frac{t_1+t_2}{\tau_{amax}}\right) - t_1 \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_{amax}}\right) - t_1 x \exp\left(-\frac{t_1+t_2}{\tau_{amax}}\right) = 0$$

Це рівняння після спрощення має вигляд

$$\frac{t_1 \exp\left(-\frac{t_2}{\tau_{amax}}\right) + t_2 x \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_{amax}}\right)}{t_2 - t_1} = x = \frac{R_n}{R_a}. \quad (5)$$

Таким чином, кожен коефіцієнт, який визначається через відношення двох значень струму абсорб-

Відповідно до визначення, омічні абсорбційні коефіцієнти, тобто коефіцієнти абсорбції, поляризації, відношення діелектричної абсорбції та індекс поляризації, дорівнюють відношенню значень опорів ізоляції виробу, виміряних через час, що дорівнює t_1 і t_2 , після подачі постійної напруги [1]:

$$k_a = \frac{R_{t_1}}{R_{t_2}} = \frac{1 + \frac{R_n}{R_a} \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_a}\right)}{1 + \frac{R_n}{R_a} \exp\left(-\frac{t_2}{\tau_a}\right)}, \quad (3)$$

де $\tau_a = C_a \cdot R_a$ – абсорбційна стала часу.

Покажемо, що всі абсорбційні коефіцієнти, що визначаються через відношення двох значень абсорбційного струму, є екстремальними величинами і їх критеріальні значення можуть бути притаманні як зволоженій чи зістареній ізоляції, так і однорідній ізоляції, в якій абсорбційні процеси проявляються дуже слабо.

Розглянемо в загальному вигляді вираз (3), що характеризує абсорбційні коефіцієнти ізоляції, позначивши $x = R_n/R_a$, і виконаємо дослідження його на екстремуми, використовуючи, як незалежні змінні відношення наскрізного опору до абсорбційного x та сталу часу абсорбційного процесу τ_a . Похідна по x виразу для абсорбційного коефіцієнта дорівнює

$$\frac{dk_a}{dx} = \frac{\exp\left(-\frac{t_2}{\tau_a}\right) - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_a}\right)}{\left(1 + x \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_a}\right)\right)^2}. \quad (4)$$

Згідно з формулою (4) умова екстремуму $dk_a/dx = 0$ виконується тільки при $x \rightarrow \infty$, тобто при $R_n/R_a \rightarrow \infty$.

Звідси випливає, що dk_a/dx є зростаючою від одиниці з насиченням функцією R_n при $R_a = \text{const}$, або аналогічною функцією відношення R_n/R_a і має односторонній максимум на нескінченності, значення якого залежить від абсорбційної сталої τ_a та від моментів часу відліку абсорбційного струму t_1 і t_2 .

Для похідної по τ_a маємо:

не може бути дефектною, якщо врахувати, що $C_a < C_g$ і має скінченне значення. Інший варіант

ції, згідно формули (5) має максимум, положення якого визначається значеннями абсорбційної сталої часу τ_{amax} , тобто добутком абсорбційних опорів R_a і ємності C_a , відношенням наскрізного опору до абсорбційного R_n/R_a , а також моментами часу відліку значень абсорбційного струму t_1 і t_2 . Положення максимуму буде впливати на значення діагностичних параме-

трів в даній точці і приводити до зміни набору значень параметрів еквівалентної схеми, які відповідають критичному значенню діагностичного параметра, що ускладнює інтерпретацію результатів контролю ізоляції.

Аналіз впливу параметрів схеми заміщення на абсорбційні коефіцієнти. Розглянемо більш детально вплив параметрів узагальненої еквівалентної схеми ізоляції на абсорбційні коефіцієнти на прикладі коефіцієнтів абсорбції та поляризації.

В нормативній літературі [1] при оцінюванні зволоження ізоляції електротехнічного і електроенергетичного устаткування за критичне значення омичного коефіцієнта абсорбції часто приймається $k_a = 1,3$. Якщо k_a має менше значення, ізоляція вважається зволоженою. В загальному випадку критичні значення k_a можуть знаходитися в межах 1,2 – 1,6. Відзначаємо, що прийнята інтерпретація k_a як критерію зволоження матеріалу не зовсім точна через істотну залежність його значення від C_a , R_a і абсорбційної сталої.

Дійсно, неоднозначність інтерпретації результатів діагностування зумовлена тим, що залежність коефіцієнта абсорбції має максимум не тільки від абсорбційної сталої, а й окремо від абсорбційної ємності при сталому значенні абсорбційного опору, а також від абсорбційного опору при сталому значенні абсорбційної ємності. Тому відзначимо те, на що практично не звертається увага: для однорідної ізоляції з неблокуючими електродами абсорбційна ємність C_a , а значить і абсорбційна стала часу τ_a , повинні бути близькими до нуля, і коефіцієнт абсорбції k_a згідно формули (1) буде близьким до 1. Тобто, і для ідеального діелектрика, коли абсорбційна стала часу близька до нуля через мале значення абсорбційної ємності, і для значно зволоженого діелектрика, коли мале значення абсорбційної сталої зумовлене малим значенням абсорбційного опору, коефіцієнт абсорбції $k_a \approx 1$. Це означає, що залежність коефіцієнта абсорбції від абсорбційної сталої екстремальна, що дійсно має місце, як показано на рис. 2. Як видно з рис. 2, в області малих значень τ_a спостерігається досить різке зниження коефіцієнта абсорбції при зменшенні τ_a , а при збільшенні τ_a після максимуму – плавний його спад.

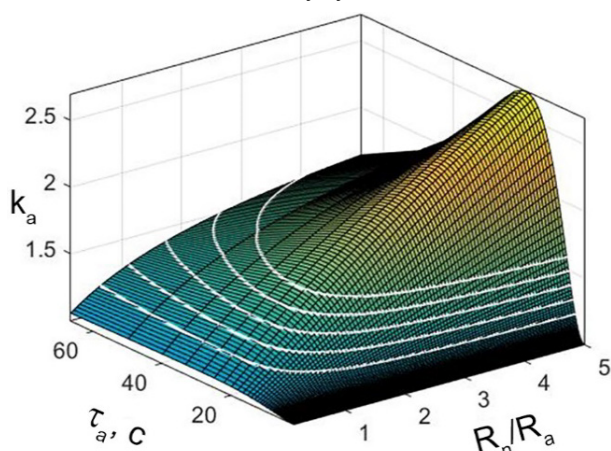


Рис. 2. Залежність коефіцієнта абсорбції від абсорбційної сталої часу та відношення наскрізного опору до абсорбційного. Наведені контури для значень коефіцієнта абсорбції 1,2 – 1,6 (знизу догори)

Коефіцієнт абсорбції k_a при $\tau_a = \text{const}$ має постійне значення, як показує розрахунок, тільки при певному співвідношенні R_n і абсорбційних характеристик. В якості прикладу на рис. 2 показаний переріз графіку площинами $k_a = [1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6]$, що відповідає значенням k_a , які приймаються за критерій при оцінці стану ізоляції електротехнічного і електроенергетичного устаткування.

Екстремальні значення k_a і сталі часу, що відповідають їм, наведені в табл. 1. Максимум коефіцієнта абсорбції k_a залежно від τ_a має місце при заданому відношенні R_n/R_a в області $\tau_a = 7,5 - 33,5$ с. Одному і тому ж значенню k_a поза максимумом при $R_n/R_a = \text{const}$ відповідають два значення сталої часу абсорбції τ_a . Так при співвідношенні $R_n/R_a = 1$ критичному значенню $k_a = 1,3$ відповідають значення $\tau_a = 13,1$ с і $\tau_a = 59$ с, а при $R_n/R_a = 10$ – значення $\tau_a = 4,25$ с і $\tau_a = 152$ с.

Таблиця 1

Параметр	R_n/R_a	0,0001	0,001	0,01	0,1	1	10	100	1000
k_a	$\tau_{\text{amax}}, \text{с}$	32,44	32,44	32,345	31,46	25,88	16,27	10,42	7,49
	k_{amax}	1	1,0005	1,0047	1,0465	1,42	3,98	18,78	102,09
k_p	$\tau_{\text{amax}}, \text{с}$	234	234	230	226	190	125	65,5	55
	k_{pmax}	1	1,0007	1,007	1,07	1,66	6,64	362,9	2841

Розрахунки при різних співвідношеннях наскрізного та абсорбційного опорів показують, що значення сталої часу τ_a , що відповідає близькому до одиниці максимальному значенню k_a , майже постійне при $R_n/R_a < 1$ і поступово знижується при $R_n/R_a > 1$, коли коефіцієнт абсорбції починає помітно зростати. Що ж стосується коефіцієнта поляризації k_p , то всі якісні закономірності, що мають місце для коефіцієнта абсорбції зберігаються, але кількісні характеристики зміщуються в сторону більших значень (табл. 1). Для обох коефіцієнтів максимальне значення коефіцієнтів прямує до нескінченості при $R_n/R_a \rightarrow \infty$ і нульовому τ_a . В той же час при нульовому значенні R_n/R_a максимальне значення коефіцієнта абсорбції має місце при $\tau_a = 32,46$ с, а для коефіцієнта поляризації k_p при $\tau_a = 234$ с.

В залежності від наскрізного опору коефіцієнт абсорбції монотонно зростає з насиченням від 1 до $\exp((t_2 - t_1)/\tau_a)$, де t_1 і t_2 – час вимірювання опору після подачі напруги, при зростанні наскрізного опору до нескінченості. При цьому слід мати на увазі, що $\exp((t_2 - t_1)/\tau_a)$ при $t_2 - t_1 = \text{const}$ експоненційно спадає зі зростанням τ_a , а тому рівень насичення k_a буде досить різним при різних абсорбційних опорах, що демонструється на рис. 3, де максимальне значення коефіцієнта абсорбції може сягати 60 при малих відношеннях R_n/R_a і $t_2 - t_1 = 60$ с. Теоретично при більших значеннях різниці $t_2 - t_1$ максимальне значення коефіцієнта абсорбції може сягати кількох сотень.

Критичне відношення опору витoku до абсорбційного опору має місце при певних значеннях абсорбційної сталої (рис. 4), які також є функцією відношення опорів R_n/R_a . Звертають на себе увагу, що максимальні значення сталої часу абсорбції τ_{amax} для коефіцієнта поляризації значно більші в порівнянні з її значеннями для коефіцієнта абсорбції в тому ж діапазоні значень R_n/R_a .

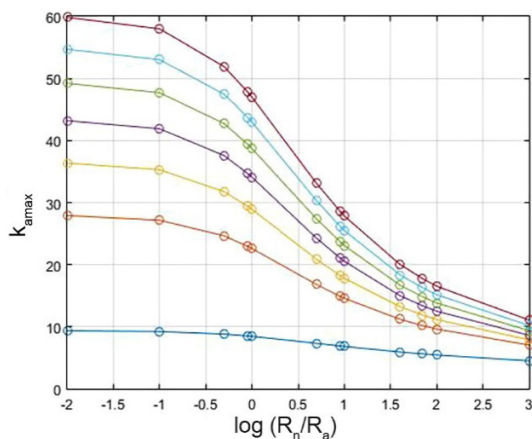


Рис. 3. Залежність максимального значення коефіцієнта абсорбції k_{amax} від $\lg(R_n/R_a)$ при значеннях різниці моментів часу вимірювання абсорбційного струму $t_2 - t_1$: 0,1, 10, 20, 30, 40, 50, 60 с (знизу догори)

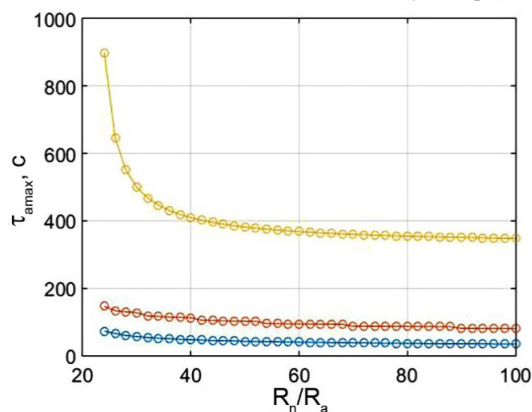


Рис. 4. Значення абсорбційної сталої τ_{amax} , що відповідають екстремуму коефіцієнта абсорбції (знизу), при $t_1 = 30$ і $t_2 = 120$ с, а також для коефіцієнта поляризації (верхня крива) в залежності від R_n/R_a

Таким чином, результати виконаного моделювання підтверджують неоднозначність омичного коефіцієнта абсорбції і коефіцієнта поляризації, як діагностичних параметрів. Неоднозначність залежності коефіцієнтів абсорбції від τ_a і залежність їх значень від відношення опорів R_n/R_a призводить до неможливості однозначної інтерпретації результатів, оскільки одне і те ж значення k_a може відповідати і матеріалу із задовільними властивостями і матеріалу з низькими рівнями опорів. Малі значення τ_a можливі як при малих значеннях C_a , характерних для якісного однорідного матеріалу, так і при малих значеннях R_a , які відповідають великій мікродфектності окремих областей цього матеріалу.

Для великих значень τ_a , що мають місце при великих C_a і R_a , інтерпретація протилежна – матеріал дуже неоднорідний, але не дуже дефектний. Окрім цієї неоднозначності слід також врахувати той факт, що при одному і тому ж незмінному значенні τ_a зростання C_a і відповідне зниження R_a відповідають за погіршення властивостей матеріалу, а зниження C_a і зростання R_a – поліпшенню, і без роздільного визначення цих параметрів неможливо відповісти на питання, в яку сторону змінюються властивості матеріалу.

Наведені міркування підтверджують, що абсорбційні коефіцієнти є досить суперечливими і складними

для інтерпретації отриманих в процесі технічного діагностування ізоляції результатів і що ефективними вони можуть бути, якщо використовувати їх для діагностування даного типу ізоляції даного виробника після попередньо проведених визначальних випробувань.

Введення додаткового діагностичного параметра для усунення неоднозначності абсорбційних коефіцієнтів. Підвищити діагностичну спроможність абсорбційних коефіцієнтів, що обмежується наявністю максимуму в залежності їх від абсорбційної сталої часу, можна використовуючи додатковий діагностичний параметр, зокрема граничне значення відношення $(R_n/R_a)_{cr}$.

Як випливає з рис. 2, існує найменше значення відношення $(R_n/R_a)_{cr}$, при подальшому зменшенні якого абсорбційний коефіцієнт буде мати значення, тільки менше критеріального при будь-яких значеннях абсорбційної сталої. Для знаходження граничних значень відношення $(R_n/R_a)_{cr}$ потрібно підставити в рівняння (3) критеріальне значення абсорбційного коефіцієнта, що дасть рівняння профілю перетину, що відповідає цьому значенню, знайти значення абсорбційної сталої

$$\tau_{amin} = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{k_a t_2}{t_1}\right)}, \quad (6)$$

що відповідає мінімуму абсорбційного коефіцієнта в залежності від відношення опорів R_n/R_a , а потім розрахувати $(R_n/R_a)_{cr}$, підставивши τ_{amin} у рівняння:

$$\left(\frac{R_n}{R_a}\right)_{cr} = \frac{k_a - 1}{\exp\left(-\frac{t_1}{\tau_{amin}}\right) - k_a \exp\left(-\frac{t_2}{\tau_{amin}}\right)}. \quad (7)$$

Розраховані за формулами (6) і (7) граничні значення відношення $(R_n/R_a)_{cr}$ для різних значень коефіцієнтів абсорбції та поляризації, та відповідні значення абсорбційних сталих часу, що відповідають цим значенням коефіцієнтів, наведені в табл. 2.

Якщо одночасно використовувати граничні значення коефіцієнтів абсорбції чи поляризації і відношення $(R_n/R_a)_{cr}$, то неоднозначність діагностування, пов'язана з наявністю максимуму у абсорбційних коефіцієнтах, буде подолана.

Таблиця 2

Значення абсорбційного коефіцієнта	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
k_a	$(R_n/R_a)_{cr}$	0,22	0,45	0,69	0,95	1,21	1,49	1,77	2,06	2,36
	$\tau_{amin}, \text{с}$	30,4	28,7	27,3	26,1	25,1	24,2	23,5	22,8	22,2
k_p	$(R_n/R_a)_{cr}$	0,145	0,293	0,44	0,60	0,75	0,91	1,07	1,23	1,39
	$\tau_{amin}, \text{с}$	225	217	210	205	199	195	191	187	183

Наведемо також формули для визначення граничних значень відношення $(R_n/R_a)_{cr}$ в залежності від значень абсорбційної сталої, що не відповідають мінімуму.

Для коефіцієнта абсорбції, що дорівнює 1,3, при $20 \text{ с} < \tau_a < 100 \text{ с}$ для граничних значень $(R_n/R_a)_{cr}$ можна записати лінеаризоване рівняння

$$\left(\frac{R_n}{R_a}\right)_{cr} = 0,29 + 0,0141 \cdot \tau_a, \quad (8)$$

а для коефіцієнта поляризації, що дорівнює 2, в області $185 \text{ с} < \tau_a < 1250 \text{ с}$ відповідно

$$\left(\frac{R_n}{R_a}\right)_{cr} = 0,215 + 0,00103 \cdot \tau_a. \quad (9)$$

Якщо отримане при діагностичному випробуванні значення $(R_n/R_a)_{cr}$ буде меншим за розраховане за формулами (8) і (9), то технічний стан ізоляції не задовільний.

Звертаємо увагу, що у цьому випадку як діагностичні параметри потрібно використовувати і $(R_n/R_a)_{cr}$, і τ_a . Запропоновані додаткові діагностичні параметри є допоміжними, що використовуються для усунення неоднозначності основного критерію коефіцієнта абсорбції чи поляризації, і їх можна застосовувати для найбільш використовуваних критичних значень коефіцієнта абсорбції $k_a = 1,3$ і коефіцієнта поляризації $k_p = 2$. При більших значеннях абсорбційних коефіцієнтів можна розраховувати $(R_n/R_a)_{cr}$ і τ_a за цими ж формулами, але вони будуть відповідати дещо заниженим граничним значенням абсорбційних коефіцієнтів.

Висновки.

Показано, що коефіцієнти абсорбції і поляризації є екстремальними функціями відношення наскрізного і абсорбційного опорів, сталої часу абсорбції, а також абсорбційних ємності і опору окремо, що знижує їх прогностичну здатність і приводить до неоднозначної інтерпретації результатів діагностування.

Обґрунтована можливість введення додаткового діагностичного параметру, що є відношенням наскрізного і абсорбційного опорів $(R_n/R_a)_{cr}$ в мінімумі лінії перетину залежності $k_a(\tau_a, R_n/R_a)$ площиною $k_a = \text{const}$, для усунення неоднозначності, пов'язаної з екстремальністю абсорбційних коефіцієнтів. Розраховано граничні значення відношення наскрізного та абсорбційного опорів $(R_n/R_a)_{cr}$ для коефіцієнтів абсорбції і поляризації в діапазоні значень від 1,1 до 2. При отриманні в процесі діагностування ізоляції значень відношення R_n/R_a , менших за граничні, при будь-яких значеннях сталої абсорбції стан ізоляції буде незадовільним.

Запропоновано формули для розрахунку критичних значень відношення R_n/R_a при значеннях абсорбційної сталої часу в діапазоні $20 < \tau_a < 100$ для $k_a = 1,3$ і $85 < \tau_a < 1250$ для коефіцієнта поляризації $k_p = 2$, які разом також можна використовувати як допоміжні діагностичні параметри для цих значень абсорбційних коефіцієнтів.

Конфлікт інтересів. Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. СОУ-Н-ЕЕ-20.302:2007. Норми-випробування електрообладнання. Київ, ДП МОУ «Воєнне видавництво України «Варта», 2007. – 262 с.
2. Носков В., Мезенцев М., Гавриленко С., Гейко Г. Контроль і діагностика стану тягового електропривода. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2021, Т. 1, № 63, С. 58-61. doi: <https://doi.org/10.26906/sunz.2021.1.058>.
3. Хамевко О. М., Сушко Д. Л. Аналіз методів контролю і діагностичних параметрів ізоляції тягових двигунів постійного струму. *Збірник наукових праць Української Державної Академії залізничного транспорту*, 2014, № 147, С. 152-155. doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.147.2014.75121>.
4. Bezprozvannyh G.V., Moskvitin E.S., Kyessayev A.G. The absorption characteristics of the phase and zone paper-impregnated insulation of power cable at direct voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 5, pp. 63-68. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.5.09>.

5. Tamus Z.A., Berta I. Application of voltage response measurement on low voltage cables. *2009 IEEE Electrical Insulation Conference*, 2009, pp. 444-447. doi: <https://doi.org/10.1109/EIC.2009.5166387>.
6. Bezprozvannyh G.V., Moskvitin E.S. Estimation criteria for degree of paper-impregnated insulated power cable ageing. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2013, no. 4, pp. 32-36. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2013.4.05>.
7. Naboka B.G., Bezprozvannyh A.V., Moskvitin E.S., Bytko M.V., Bytko S.M., Golovan A.A. Diagnostics of power system cable lines on dielectric dissipation factor and impregnated-paper insulation self-discharge time constant. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2011, no. 2, pp. 65-69. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2011.2.14>.
8. Németh B., Csépes G., Vörös C. Applicability of the dielectric response methods of diagnostics of power transformers: Hungarian experiences. *2011 Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2011, pp. 49-53. doi: <https://doi.org/10.1109/EIC.2011.5996114>.
9. Sarkar S., Sharma T., Baral A., Chatterjee B., Dey D., Chakravorti S. A new approach for determination of moisture in paper insulation of in-situ power transformers by combining polarization-depolarization current and return voltage measurement results. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, vol. 20, no. 6, pp. 2325-2334. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6678886>.
10. Gavrilă D.E., Ciprian I., Gavrilă H.C. Applying the Recovery Voltage Method (RVM) to Study the Degradation of High Power Transformer Insulation. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 911, pp. 260-265. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.911.260>.
11. Mustafa E., Németh R.M., Afia R.S.A., Tamus Z.Á. Parameterization of Debye Model for Dielectrics Using Voltage Response Measurements and a Benchmark Problem. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 2021, vol. 65, no. 2, pp. 138-145. doi: <https://doi.org/10.3311/ppce.16399>.
12. Tamus Z.Á. Combination of voltage response method with non-contact electrostatic voltage measurement to determine the dielectric response of insulating materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1322, p. 012042. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1322/1/012042>.
13. Sun Y., Li Z., Han Y., Suo C. An effective method to avoid charge leakage along the surface in voltage response measurement. *Review of Scientific Instruments*, 2021, vol. 92, no. 5, p. 055104. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0051428>.
14. Розіскулов С.С. Михайлів В.І., Грабчук Б.І. Перехідні електромагнітні процеси у неоднорідній електричній ізоляції високовольтних кабелів при її діагностиці методами вимірювання і аналізу струму релаксації та поверненої напруги. *Методи та прилади контролю якості*, 2013, № 1(30), С. 84-91. Режим доступу: <http://194.44.112.13/journals/3328p.pdf> (Дата звернення: 16.06.2021).
15. Bezprozvannyh G.V., Kostiukov I.A. Error of control of electrical insulation structures by dielectric absorption parameters according to the concept of uncertainty of measurements. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 1, pp. 47-51. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.07>.

REFERENCES

1. SOU-N-EE-20.302:2007. *Testing norms for electrical equipment*. Kyiv, DP MOU «Voienne vydavnytstvo Ukrainy «Varta», 2007. 262 p. (Ukr).
2. Noskov V., Mezsetsev M., Gavrylenko S., Heiko H. Control and diagnosis of the condition the traction electric drive. *Systems of Control, Navigation and Communication*, 2021, vol. 1, no. 63, pp. 58-61. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.26906/sunz.2021.1.058>.

3. Khamevko O.N., Sushko D.L. Analysis of methods control and diagnostic parameters isolation the traction engine of direct current. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 2014, no. 147, pp. 152-155. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.147.2014.75121>.
4. Bezprozvannyh G.V., Moskvitin E.S., Kyessayev A.G. The absorption characteristics of the phase and zone paper-impregnated insulation of power cable at direct voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 5, pp. 63-68. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.5.09>.
5. Tamus Z.A., Berta I. Application of voltage response measurement on low voltage cables. *2009 IEEE Electrical Insulation Conference*, 2009, pp. 444-447. doi: <https://doi.org/10.1109/EIC.2009.5166387>.
6. Bezprozvannyh G.V., Moskvitin E.S. Estimation criteria for degree of paper-impregnated insulated power cable ageing. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2013, no. 4, pp. 32-36. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2013.4.05>.
7. Naboka B.G., Bezprozvannyh A.V., Moskvitin E.S., Bytko M.V., Bytko S.M., Golovan A.A. Diagnostics of power system cable lines on dielectric dissipation factor and impregnated-paper insulation self-discharge time constant. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2011, no. 2, pp. 65-69. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2011.2.14>.
8. Németh B., Csépes G., Vörös C. Applicability of the dielectric response methods of diagnostics of power transformers: Hungarian experiences. *2011 Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2011, pp. 49-53. doi: <https://doi.org/10.1109/EIC.2011.5996114>.
9. Sarkar S., Sharma T., Baral A., Chatterjee B., Dey D., Chakravorti S. A new approach for determination of moisture in paper insulation of in-situ power transformers by combining polarization-depolarization current and return voltage measurement results. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, vol. 20, no. 6, pp. 2325-2334. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6678886>.
10. Gavrila D.E., Ciprian I., Gavrila H.C. Applying the Recovery Voltage Method (RVM) to Study the Degradation of High Power Transformer Insulation. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 911, pp. 260-265. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.911.260>.
11. Mustafa E., Németh R.M., Afia R.S.A., Tamus Z.A. Parameterization of Debye Model for Dielectrics Using Voltage Response Measurements and a Benchmark Problem. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 2021, vol. 65, no. 2, pp. 138-145. doi: <https://doi.org/10.3311/ppce.16399>.
12. Tamus Z.A. Combination of voltage response method with non-contact electrostatic voltage measurement to determine the dielectric response of insulating materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1322, p. 012042. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1322/1/012042>.
13. Sun Y., Li Z., Han Y., Suo C. An effective method to avoid charge leakage along the surface in voltage response measurement. *Review of Scientific Instruments*, 2021, vol. 92, no. 5, p. 055104. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0051428>.
14. Roziskulov S.S., Mykhailiv V.I., Hrabchuk B.L. Transient electromagnetic processes in inhomogeneous electrical isolation of high-voltage cables during its diagnosis by methods of measuring and analyzing the relaxation current and the return voltage. *Methods and devices of quality control*, 2013, no. 1(30), pp. 84-91. (Ukr). Available at: <http://194.44.112.13/journals/3328p.pdf> (accessed 16 June 2021).
15. Bezprozvannyh G.V., Kostiukov I.A. Error of control of electrical insulation structures by dielectric absorption parameters according to the concept of uncertainty of measurements. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 1, pp. 47-51. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.07>.

Надійшла (Received) 09.10.2021
 Прийнята (Accepted) 12.11.2021
 Опублікована (Published) 03.12.2021

Кириленко Всеволод Михайлович¹, к.т.н., доц.,
 Кириленко Катерина Всеволодівна¹, к.т.н.,
 Бודько Марина Олександрівна¹, к.т.н.,
 Денисюк Петро Левкович¹, к.т.н., доц.

¹ Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
 03056, Київ, пр. Перемоги, 37,
 e-mail: vsemychkirg@gmail.com (Corresponding Author)

V.M. Kyrylenko¹, K.V. Kyrylenko¹, M.O. Budko¹, P.L. Denysiuk¹

¹ National Technical University of Ukraine
 «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
 37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

Reasoning of additional diagnostic parameters for electric insulation diagnostics by absorption methods.

The **aim** of this work is to analyze the inadequacies of the diagnostic parameters, in particular the absorption and polarization coefficients, which are manifested in their integral character and dependence on the ratio of values of several elements of the equivalent scheme of insulation replacement. This article contains the results of theoretical investigation of the extreme nature of the absorption diagnostic parameters, which leads to unambiguity of the diagnostics procedure. The ways of partial adjustment of this unambiguity have been proposed. **Methodology.** To determine the extremality of the absorption coefficients depending on the absorption time, absorption capacity and resistance, as well as the leakage resistance, the usual method of investigating the functions was used, detailed calculations have been obtained by using MATLAB software. **Results.** Has been shown that the ambiguity of diagnostic results is caused by the contradiction of the integral character of the diagnostic parameters and the local character of the isolation failures, in particular breakdown, by ambiguous dependence of the diagnostic parameters on the values of the elements of the insulation replacement scheme and the extremal nature of the diagnostic parameters. Based on the general expression describing all currently used absorption coefficients, it is shown that they all have an extremum, the value of which depends on the parameters of the insulation substitution scheme and the time interval between the measurements of the absorption current. The dependence of the extreme value of the absorption and polarization coefficients on the parameters of the insulation substitution scheme has been established. Has been shown that to eliminate the ambiguity caused by the extremity of the absorption coefficients, it is necessary to introduce additional diagnostic parameters, such as the ratio of leakage resistance to absorption resistance, as well as the critical value of the absorption time constant. **Originality.** The detailed analysis of the reasons of ambiguity of electric insulation technical diagnostics by absorption methods has been carried out. A method for eliminating the ambiguity caused by the extremity of the absorption coefficients has been proposed. **Practical significance.** To eliminate the ambiguity caused by the extremity of the absorption coefficients, additional diagnostic parameters are proposed – the ratio of leakage resistance to the absorption resistance and critical values of the absorption time constant. The applying of these parameters with the absorption coefficients will more adequately assess the technical condition of insulation. References 15, tables 2, figures 4.

Key words: non-destructive insulation diagnostics, absorption methods of insulation diagnostics, diagnostic parameters of insulation, dielectric absorption ratio, absorption index, polarization index.